

入侵植物野胡萝卜浸提液对4种草坪草的化感效应

廖博通¹, 陈琳¹, 刘志华¹, 刘阳华¹, 文明英¹, 向国红^{2*}

¹衡阳市蔬菜研究所, 湖南 衡阳 421000; ²湖南人文科技学院, 湖南 娄底 417000

摘要:【目的】明确入侵植物野胡萝卜水浸提液对4种草坪草的化感效应。【方法】采用培养皿滤纸法, 观察记录不同浓度(0、10、20、30、40 g·L⁻¹)的野胡萝卜根、茎、叶水浸提液对4种草坪草种子萌发的影响, 根据化感综合效应指数分析野胡萝卜水浸提液的化感作用。【结果】野胡萝卜不同部位浸提液对受体种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长和芽长均有一定的影响。化感综合效应指数表明, 随着野胡萝卜浸提液浓度的增加, 对白三叶、黑麦草、翦股颖的化感抑制作用均增强, 对高羊茅的化感作用表现为“低促高抑”的双重效应。4种草坪草的耐受强弱顺序为: 高羊茅>黑麦草>翦股颖>白三叶; 野胡萝卜叶浸提液对4种草坪草的化感作用强于根和茎。【结论】入侵植物野胡萝卜浸提液对4种草坪草的化感效应较为显著, 在入侵严重地区, 可选用耐受力强的草坪草建坪。

关键词: 野胡萝卜; 化感作用; 草坪草; 种子萌发



开放科学标识码
(OSID 码)

Allelopathic effects of the extracts of the invasive plant *Daucus carota* L. on four turf grasses

LIAO Botong¹, CHEN Lin¹, LIU Zhihua¹, LIU Yanghua¹, WEN Mingying¹, XIANG Guohong^{2*}

¹Hengyang Academy of Vegetable Research, Hengyang, Hunan 421000, China;

²Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi, Hunan 417000, China

Abstract: 【Aim】 This study aimed to test the allelopathic effect of the water extract of the invasive plant *Daucus carota* L. on four plant species. 【Method】 The effects of water extracts from roots, stems, and leaves of *D. carota* L. at different concentrations (0, 10, 20, 30, and 40 g·L⁻¹) on the seed germination of four species were observed and recorded by using the method of filter paper in the culture dish. The allelopathic effects of the water extracts of *D. carota* L. were analyzed according to the allelopathic comprehensive effect index. 【Result】 The extracts from different parts of *D. carota* L. had certain effects on the germination rate, germination potential, germination index, vigor index, root length, and shoot length of the recipient seeds. Moreover, synthetic effects of allelopathic index showed that with the increase of the concentration of the water extract from the roots, stems, and leaves of *D. carota* L., the allelopathy inhibition to *Trifolium repens* L., *Lolium perenne* L., and *Agrostis matsumurae* L. increased. The allelopathic effect to *Festuca arundinacea* L. was a double effect of "low promotion and high inhibition". The order of tolerance for the four turf grasses was *F. arundinacea* L. > *L. perenne* L. > *A. matsumurae* L. > *T. repens* L., and the allelopathic effect of the leaf extract from *D. carota* L. on these species was stronger than that of the roots and stems. 【Conclusion】 The allelopathic effect of the extract of *D. carota* L. on the 4 plant species is significant. Species with strong tolerance can be used for revegetation in serious invasion areas.

Key words: *Daucus carota*; allelopathy; lawn grass; seed germination

化感作用是指植物或微生物通过向环境释放化感物质, 从而对自身或其他植物的生长发育产生有利或有害的作用 (Kalisz *et al.*, 2021; Kayanifaro *et al.*, 2017)。化感物质几乎存在于植物体的各个器官

中, 不同器官所产生的化感物质对植物的影响具有一定的差异 (Peng, 2019)。自然条件下, 植物化感物质主要通过根系分泌、地上部淋溶、茎叶挥发和植株枯落物在土壤中降解等方式释放到自然界, 化感物

收稿日期 (Received): 2022-09-02 接受日期 (Accepted): 2023-03-10

基金项目: 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目 (2020NK2001); 湖南省自然科学基金省市联合项目 (2022JJ50017); 衡阳市科技计划项目 (202150063722)

作者简介: 廖博通, 男, 硕士研究生。研究方向: 植物研究。E-mail: liaobotong@126.com

* 通信作者 (Author for correspondence), 向国红, E-mail: 591840254@qq.com

质的释放是外来入侵植物成功入侵的重要因子(Sara *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2021)。多数入侵植物具有适应性强、生长速度快、繁殖能力强等特点,通过植物化感途径影响本土植物生长,广泛存在于农田、荒地、草地、林地和湿地等生态环境中(李玉霞等, 2019; 廖慧璇等, 2021)。入侵到农作物区,通过释放化感物质,影响农作物的生长发育(李澳然等, 2020; 卢东升等, 2019),如假臭草 *Eupatorium catarium* Veldkamp 水浸提液对4种作物种子萌发和幼苗生长均有较强的化感作用,且随着浸提液浓度的增大,化感效应显著增强(马永林等, 2016);入侵到荒地,通过迅速定居和分泌化感物质,抑制本土植物种子萌发和生长,影响本土植物的株数和地上生物量(李凤兰等, 2020; 桂富荣等, 2011),如薇甘菊 *Mikania micrantha* H.B.K.水溶性化感物质能够促进有效氮的生成,进而促进自身生长并抑制本地植物的生长(郑亚萍等, 2021);入侵到草地生态区,一方面向周围环境释放化学物质产生化感作用,影响草地植物的生长,另一方面与本地植物竞争资源,减少原有群落中的优势植物,降低群落物种多样性,影响草地功能,恶化草场质量(鲁京慧, 2018; 赵威等, 2017)。

野胡萝卜 *Daucus carota* L. 原产于欧洲,是伞形科胡萝卜属两年生草本植物,全国各地均有分布(张玥等, 2021),在我国部分地区的草地生态系统中已成为恶性入侵植物(曹婧等, 2020)。研究表明,野胡萝卜水浸提液对禾本科杂草具有一定的化感作用(陶俊杰等, 2014),但关于野胡萝卜水浸提液对草坪草种子萌发和幼苗生长的研究鲜有报道。本试验采用室内生物测定的方法,研究野胡萝卜根、茎、叶不同浓度水浸提液对白三叶 *Trifolium repens* L.、黑麦草 *Lolium perenne* L.、翦股颖 *Agrostis stolonifera* L. 和高羊茅 *Festuca arundinacea* L. 种子萌发和幼苗生长的影响,旨在探究野胡萝卜不同部位浸提液的化感差异,评价不同草坪草对野胡萝卜化感作用的耐受差异,为野胡萝卜入侵严重地区草地的建植及入侵机制研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2021年6月,在湖南省衡阳市泉溪镇(26°87'N, 112°75'E, 平均海拔78 m)采集野胡萝卜根系和茎叶。白三叶、黑麦草、翦股颖和高羊茅种子购于北京正道生态科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 野胡萝卜水浸提液的制备 参考姚树宽等(2018)的方法,将采集到的野胡萝卜根、茎和叶分开,蒸馏水洗净,所有样品经自然风干后剪成1~2 cm的长度进行粉碎,粉碎后过0.425 mm孔径筛。分别称取野胡萝卜根、茎和叶粉末40 g,加1000 mL蒸馏水在25 °C条件下,120 r·min⁻¹振荡浸提48 h,用3层纱布和双重滤纸过滤浸提液,再用孔径为0.45 μm微孔滤膜过滤,得到浓度为40 g·L⁻¹的野胡萝卜根、茎和叶浸提液母液,再用蒸馏水稀释成10、20、30 g·L⁻¹浸提液,4 °C冰箱保存备用。

1.2.2 化感作用测定 采用培养皿滤纸发芽法进行萌发试验(周娟娟等, 2021),选50粒大小均匀颗粒饱满的供试草坪草种子,用0.3%的高锰酸钾溶液消毒10 min,无菌水冲洗5次,再用滤纸吸干种子表面水分,置于直径为9 cm铺有双层滤纸的培养皿中。分别加入不同浓度的野胡萝卜根、茎和叶浸提液5 mL,以蒸馏水为对照(CK),每个处理设3次重复,在25 °C恒温光照培养箱中12 h光照培养,每天适当补充浸提液和蒸馏水以保持湿润。

1.2.3 测定项目和方法 每日以胚芽突破种皮1 mm为标准记录发芽种子数,第5天计算发芽势(germination potential, P_G),第7天计算发芽率(germination rate, R_G)、发芽指数(germination index, I_G)、活力指数(vigor index, I_V),第7天从培养皿中随机选取10株幼苗,用精度为1 mm的直尺测量幼苗根长(root length, L_R)和芽长(shoot length, L_S)。

$$P_G/\% = 5 \text{ d 内发芽种子数} / \text{供试种子} \times 100;$$

$$R_G/\% = 7 \text{ d 内发芽种子数} / \text{供试种子} \times 100;$$

$$I_G = \sum (t_G/t);$$

$$I_V = I_G S;$$

式中: t_G 为逐日发芽数, t 为相应的发芽天数, S 为发芽周期结束时的芽长。

参照 Williamson *et al.* (1988)的方法,计算化感效应指数(response index, I_R), $I_R = 1 - C/T$ ($T \geq C$)或 $I_R = T/C - 1$ ($T < C$),式中, C 为对照值, T 为处理值。 $I_R > 0$ 表示促进作用, $I_R < 0$ 为抑制作用,绝对值的大小与化感作用强度一致。

化感综合效应指数(synthetic effects of allelopathic index, I_{SE})为同一浸提液处理对同一受体植物各个测试指标 I_R 的算术平均值, $I_{SE} = (I_{R1} + I_{R2} + I_{R3} + I_{R4} + I_{R5} + I_{R6})/6$,式中, $I_{R1} \sim I_{R6}$ 分别为发芽势、

发芽率、发芽指数、活力指数、根长和苗长的化感效应指数。 $I_{SE} < 0$ 为抑制作用, $I_{SE} > 0$ 为促进作用, 绝对值大小表示化感效应作用强度。

1.3 数据分析

利用 Excel 2003 进行数据处理, 采用 SPSS 22.0 软件进行单因素 (one-way ANOVA) 和三因素方差分析 (three-way ANOVA), Duncan 氏法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 野胡萝卜不同部位浸提液对受体植物种子发芽率的影响

随着野胡萝卜根、茎、叶浸提液浓度的增加, 白三叶和翦股颖的发芽率呈降低趋势, 黑麦草发芽率

在野胡萝卜根、叶浸提液处理下, 高羊茅发芽率在野胡萝卜茎、叶浸提液处理下, 随浓度的增加呈先增高后降低的趋势(表 1)。野胡萝卜根、茎、叶浸提液对白三叶和翦股颖的发芽率抑制程度大于黑麦草和高羊茅的, 且在浸提液浓度为 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 4 种草坪草的发芽率均为最低值, 与 CK 相比, 均具显著差异 ($P < 0.05$)。在根浸提液处理下分别降低 71.53%、12.95%、46.06% 和 16.08%, 在茎浸提液处理下分别降低 56.94%、10.08%、52.81% 和 11.18%, 在叶浸提液处理下分别降低 100.00%、15.83%、79.77% 和 34.26%。野胡萝卜根、茎、叶浸提液对 4 种草坪草发芽率的抑制情况总体表现为叶的抑制强度大于根和茎。

表 1 野胡萝卜不同部位浸提液处理下 4 种草坪草种子的发芽率

Table 1 Seed germination rates of four species treated with extracts from different parts of *D. carota* at different concentrations

处理 Treatment	浓度 Concentration /($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	发芽率 Germination rate/%			
		白三叶 <i>T. repens</i>	黑麦草 <i>L. perenne</i>	翦股颖 <i>A. stolomifera</i>	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>
CK	0	91.33±0.94a	92.67±1.89a	59.33±4.99a	95.33±3.77abc
根 Root	10	59.33±10.37b	93.33±0.94a	42.67±3.77bcd	95.33±2.49abc
	20	51.33±3.40b	88.00±7.12ab	34.67±0.94de	95.33±2.49abc
	30	37.33±5.73c	86.00±1.63bcd	33.33±0.94def	89.33±3.40bcd
	40	26.00±4.32d	80.67±0.94bc	32.00±2.83ef	80.00±1.63ef
茎 Stem	10	86.67±2.49a	92.00±1.63a	46.00±1.63b	97.33±0.94a
	20	84.00±4.32a	92.00±4.90a	44.67±3.40bc	96.67±1.89ab
	30	80.67±6.80a	88.67±0.94abc	42.67±4.99bcd	88.67±4.11cd
	40	39.33±3.40c	83.33±4.11bcd	28.00±8.49ef	84.67±2.49de
叶 Leaf	10	17.33±2.49de	93.33±2.49a	50.00±2.83b	96.67±0.94ab
	20	16.00±8.00ef	91.33±3.77ab	35.33±4.99cde	94.67±4.11abc
	30	3.00±1.00f	78.67±4.11d	24.67±6.60f	74.00±5.66f
	40	0.00±0.00f	78.00±4.90d	12.00±1.63g	62.67±5.25g

同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different letters in same column indicate significant differences between treatments at the 0.05 level.

2.2 野胡萝卜不同部位浸提液对受体植物种子发芽势的影响

随着野胡萝卜根、茎、叶浸提液浓度的增加, 白三叶和翦股颖的发芽势呈降低趋势, 黑麦草和高羊茅发芽势在野胡萝卜根、茎浸提液处理下, 随浓度的增加呈先增高后降低趋势(表 2)。当根浸提液浓度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 白三叶和翦股颖的发芽势与 CK 相比, 分别降低了 34.09% 和 39.09%, 均显著低于 CK ($P < 0.05$), 黑麦草和高羊茅的发芽势与 CK 相比分别增加了 6.26% 和 7.64%, 差异均不显著; 在茎浸提液浓度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 白三叶和翦股颖的发芽势与 CK 相比, 分别降低了 5.31% 和 35.64%, 其中翦股颖的发芽势显著低于 CK ($P < 0.05$), 黑麦草和高羊茅的发芽势分别增加了 3.13% 和 6.11%, 与 CK 差异均不显著; 在叶浸提液浓度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 白

三叶、黑麦草、翦股颖和高羊茅的发芽势与 CK 相比, 分别降低了 81.06%、2.34%、20.69% 和 0.72%, 其中白三叶和翦股颖的发芽势显著低于 CK ($P < 0.05$)。当浸提液浓度为 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 白三叶、黑麦草、翦股颖和高羊茅的发芽势均显著低于 CK ($P < 0.05$), 在根浸提液处理下分别降低了 71.97%、25.78%、62.07% 和 11.45%, 在茎浸提液处理下分别降低了 56.82%、15.62%、70.12% 和 5.34%, 在叶浸提液处理下分别降低了 100%、36.72%、80.47% 和 29.77%。野胡萝卜根、茎、叶浸提液对 4 种草坪草的发芽势抑制情况总体表现为叶的抑制强度大于根和茎。

2.3 野胡萝卜不同部位浸提液对受体植物种子发芽指数的影响

随着野胡萝卜根、茎、叶浸提液浓度的增加, 白三叶和翦股颖的发芽指数呈降低趋势, 与 CK 相比,

均具有显著差异 ($P < 0.05$), 黑麦草的发芽指数在野胡萝卜茎浸提液处理下, 随浓度的增加呈先增高后降低趋势, 高羊茅的发芽指数在野胡萝卜根、茎、叶浸提液处理下, 随浓度的增加呈先增高后降低趋势 (表3)。野胡萝卜根、茎、叶浸提液对白三叶和翦股颖的发芽指数抑制程度大于黑麦草和高羊茅, 且浸提液浓度为 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 白三叶、黑麦草、翦股颖

和高羊茅4种草坪草的发芽指数达到最低值, 与CK相比, 均具有显著差异 ($P < 0.05$), 在根浸提液处理下分别降低了79.29%、35.96%、71.66%和17.33%, 在茎浸提液处理下分别降低了78.37%、25.58%、70.43%和13.74%, 在叶浸提液处理下分别降低了100%、37.05%、81.93%和48.39%。

表2 野胡萝卜不同部位浸提液处理下4种草坪草的发芽势

Table 2 Germination potential of four species treated with extracts from different parts of *D. carota* at different concentrations

处理 Treatment	浓度 Concentration /($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	发芽势 Germination potential/%			
		白三叶 <i>T. repens</i>	黑麦草 <i>L. perenne</i>	翦股颖 <i>A. stolonifera</i>	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>
CK	0	88.00±1.63a	85.33±2.49ab	58.00±5.89a	87.33±4.11ab
根 Root	10	58.00±9.93b	90.67±3.40a	35.33±0.94b	94.00±2.83a
	20	50.67±4.11b	81.33±8.06abc	29.33±3.40cd	92.67±4.11a
	30	36.67±4.99c	80.00±1.63abc	25.33±2.49ef	85.33±4.99abc
	40	24.67±4.71d	63.33±2.49de	22.00±1.63g	77.33±3.77c
茎 Stem	10	83.33±4.11a	88.00±3.27ab	37.33±1.89c	92.67±0.94a
	20	82.67±2.49a	87.33±2.49bc	35.33±3.40c	91.33±3.40ab
	30	80.67±6.80a	77.33±0.94d	34.67±6.80c	86.00±7.48abc
	40	38.00±4.32c	72.00±5.66d	17.33±4.11fg	82.67±3.77bc
叶 Leaf	10	16.67±2.49de	83.33±6.60ab	46.00±4.32b	86.70±5.66ab
	20	8.67±7.36ef	77.33±5.25bc	32.67±5.25cd	86.00±3.27abc
	30	1.33±1.89f	58.00±6.53e	20.67±6.60ef	68.67±2.49d
	40	0.00±0.00f	54.00±7.12e	11.33±0.94g	61.33±3.40d

同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different letters in same column indicate significant differences between treatments at the 0.05 level.

表3 野胡萝卜不同部位浸提液处理下4种草坪草的发芽指数

Table 3 Germination indexes of four species treated with extracts from different parts of *D. carota* at different concentrations

处理 Treatment	浓度 Concentration /($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	发芽指数 Germination index			
		白三叶 <i>T. repens</i>	黑麦草 <i>L. perenne</i>	翦股颖 <i>A. stolonifera</i>	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>
CK	0	35.88±0.58a	15.60±0.36ab	9.74±1.26a	13.39±0.86bcde
根 Root	10	19.58±5.66cd	15.49±0.57ab	5.36±0.17c	15.06±0.43a
	20	17.61±3.02d	13.24±1.39cde	3.95±0.06def	14.34±0.29ab
	30	10.66±1.47e	12.56±0.35de	3.60±0.12ef	13.10±0.58cde
	40	7.43±2.13ef	9.99±0.28f	2.76±0.10fg	11.07±0.62g
茎 Stem	10	27.73±3.53b	15.77±0.54a	5.51±0.08c	14.07±0.49abc
	20	23.52±1.93bc	13.88±0.30bcd	5.07±0.52cd	13.73±0.37bcd
	30	22.80±3.39bcd	12.95±0.08de	4.65±0.61cde	12.30±0.55ef
	40	7.76±1.08ef	11.61±1.25e	2.88±0.78fg	11.55±0.66fg
叶 Leaf	10	3.21±0.46fg	14.88±0.87abc	7.82±0.62b	13.74±0.61bcd
	20	1.54±1.39g	12.76±1.41de	5.22±0.83cd	12.68±0.42def
	30	0.28±0.28g	9.85±0.47f	3.25±0.76f	8.93±0.51h
	40	0.00±0.00g	9.82±0.75f	1.76±0.22g	6.91±0.23i

同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different letters in same column indicate significant differences between treatments at the 0.05 level.

2.4 野胡萝卜不同部位浸提液对受体植物种子活力指数的影响

随着野胡萝卜根、茎、叶浸提液浓度的增加, 白三叶、黑麦草和翦股颖的活力指数呈降低趋势, 高羊茅的发芽指数随浓度的增加呈先增高后降低趋势 (表4)。当根浸提液浓度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 白三叶

和翦股颖的活力指数分别降低了54.52%和24.57%, 显著低于CK ($P < 0.05$), 高羊茅的活力指数增加了37.75%, 显著高于CK ($P < 0.05$); 在 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 茎浸提液处理下, 白三叶、黑麦草和翦股颖的活力指数分别降低了10.33%、12.31%和33.87%, 其中翦股颖的活力指数显著低于CK ($P < 0.05$), 高羊茅的活力指数

增加了 34.91%，显著高于 CK ($P < 0.05$)；在 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 叶浸提液处理下，白三叶、黑麦草和翦股颖的活力指数分别降低了 90.86%、23.67% 和 5.97%，其中白三叶和黑麦草的活力指数显著低于 CK ($P < 0.05$)，高羊茅的活力指数增加了 2.58%，与 CK 相比差异不显著。当浸提液浓度为 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

时，白三叶、黑麦草、翦股颖和高羊茅的发芽指数显著低于 CK ($P < 0.05$)，在根浸提液处理下分别降低了 82.31%、45.50%、64.91% 和 29.68%，在茎浸提液处理下分别降低了 82.40%、52.30%、73.41% 和 21.52%，在叶浸提液处理下分别降低了 100%、69.16%、83.62% 和 79.64%。

表 4 野胡萝卜不同部位浸提液处理下 4 种草坪草的活力指数

Table 4 Activity indexes of four species treated with extracts from different parts of *D. carota* at different concentrations

处理 Treatment	浓度 Concentration /($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	活力指数 Vigor index			
		白三叶 <i>T. repens</i>	黑麦草 <i>L. perenne</i>	翦股颖 <i>A. stolonifera</i>	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>
CK	0	21.88±2.25a	75.85±2.09a	9.89±1.13a	43.02±3.99bcd
根 Root	10	9.95±2.53c	75.80±1.71a	7.46±0.96bc	59.26±0.75a
	20	9.78±1.19c	58.64±6.48bc	5.04±0.54de	46.99±1.40bc
	30	5.53±0.66c	51.37±2.57cde	4.47±0.71def	40.57±2.06cde
	40	3.87±1.31de	41.34±3.46ef	3.47±0.63efg	30.25±2.31f
茎 Stem	10	19.62±3.00a	66.51±5.92ab	6.54±0.24cd	58.04±6.05a
	20	15.33±2.74b	52.58±0.63cd	5.61±0.54cd	49.63±2.47b
	30	14.12±2.53b	47.17±0.81de	4.78±0.47de	38.66±2.01de
	40	3.85±0.40de	36.18±7.45f	2.63±0.60fg	33.76±4.75ef
叶 Leaf	10	2.00±0.37de	57.90±8.52bc	9.30±1.34ab	44.13±4.95bcd
	20	0.94±0.87e	43.19±6.73def	6.13±1.95cd	31.05±4.61f
	30	0.18±0.21e	22.66±1.97g	3.35±0.91efg	14.05±0.45g
	40	0.00±0.00e	23.39±0.99g	1.62±0.23g	8.76±1.23g

同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different letters in same column indicate significant differences between treatments at the 0.05 level.

2.5 野胡萝卜不同部位浸提液对 4 种草坪草根长的影响

由表 5 可知，在野胡萝卜根、茎、叶浸提液浓度 $\geq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，白三叶根长均显著低于 CK ($P < 0.05$)，叶浸提液浓度为 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时为最低值，降低了 100%；在野胡萝卜根、茎、叶浸提液浓度 $\geq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，黑麦草根长均显著低于 CK ($P < 0.05$)，根、茎浸提液浓度为 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时为最低值，分别降低了 47.28%、38.49%；在野胡萝卜根浸提液浓度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，翦股颖根长显著高于 CK ($P < 0.05$)，随着浸提液浓度的增加根长逐渐降低，与 CK 差异不显著，在茎浸提液浓度 $\geq 20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，叶浸提液浓度 $\geq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时，与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)；高羊茅的根长与 CK 相比，在根浸提液浓度 $\geq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，茎浸提液浓度 $\geq 30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，叶浸提液浓度 $\geq 20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，差异显著 ($P < 0.05$)，浸提液浓度为 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时为最低值，分别降低了 50.81%、31.27%、53.75%。

2.6 野胡萝卜不同部位浸提液对 4 种草坪草芽长的影响

由表 6 可知，在叶浸提液浓度为 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，白三叶的芽长显著低于 CK ($P < 0.05$)；黑麦草的芽

长与 CK 相比，在根浸提液浓度 $\geq 30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，茎、叶浸提液浓度 $\geq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时差异显著 ($P < 0.05$)，茎、叶浸提液浓度为 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时为最低值，分别降低了 36.63%、50.82%；高羊茅的芽长与 CK 相比，在叶浸提液浓度 $\geq 20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时显著低于 CK ($P < 0.05$)，在根、茎、叶浸提液浓度为 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时最低，分别降低了 14.95%、9.35%、60.44%。

2.7 影响草坪草种子萌发的三因素交互作用分析

单因素方差分析下，草坪草品种、浸提液种类及浓度对草坪草种子萌发存在极显著影响 ($P < 0.01$) (表 7)。双因素方差分析下，浸提液种类和浸提液浓度交互作用对发芽率、发芽势、根长和芽长存在极显著影响 ($P < 0.01$)；浸提液种类和草坪草品种交互作用对草坪草种子萌发有极显著影响 ($P < 0.01$)；浸提液浓度和草坪草品种交互作用对发芽指数、活力指数和芽长具有极显著影响 ($P < 0.01$)，对根长有显著影响 ($P < 0.05$)。在三因素方差分析中，浸提液种类、浸提液浓度和草坪草品种的互作对发芽率、发芽势、发芽指数有极显著影响 ($P < 0.01$)，对根长有显著影响 ($P < 0.05$)。从浸提液种类、浸提液浓度和草坪草品种对草坪草种子萌发及幼苗生长的交互作用分析

来看,浸提液浓度因素影响较弱。

2.8 野胡萝卜不同部位浸提液对4种草坪草的化感综合效应

野胡萝卜根、茎、叶浸提液对白三叶、黑麦草和翦股颖种子均存在一定的化感抑制作用,随着野胡萝卜浸提液浓度的增加,其化感抑制作用逐渐加强(表8)。野胡萝卜根、茎、叶浸提液对高羊茅种子则表现为“低促高抑”的双重效应。4种草坪草种子中,白三叶、翦股颖比黑麦草、高羊茅更易受野胡萝卜浸提液的影响,其中野胡萝卜根、叶浸提液对4种草坪草种子的抑制作用强弱顺序为白三叶>翦股颖>黑麦草>高羊茅,野胡萝卜茎浸提液对4种草坪

草种子的抑制作用强弱顺序为翦股颖>白三叶>黑麦草>高羊茅。

3 讨论

化感作用是植物在长期进化过程中形成的一种适应机制,有利于提高植物竞争资源和空间的优势,化感物质能抑制种子胚生长、影响种子细胞结构并干扰种子中活性氧的产生与积累、打破种子内源激素平衡等(Toshihiro, 2019)。植物化感作用强弱与受试植物种类、浸提液部位及浓度有关(赵威等, 2017)。化感物质主要是植物次生代谢产物,自然界中常见的化感物质有酚类、萜类和生物碱类物质等(师小平等, 2020)。

表5 野胡萝卜不同部位浸提液处理下4种草坪草的根长

Table 5 Root length of four species treated with extracts from different parts of *D. carota* at different concentrations

处理 Treatment	浓度 Concentration /(g · L ⁻¹)	根长 Root length/cm			
		白三叶 <i>T. repens</i>	黑麦草 <i>L. perenne</i>	翦股颖 <i>A. stolonifera</i>	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>
CK	0	3.15±0.34a	4.78±0.09a	1.07±0.07b	3.07±0.24ab
根 Root	10	0.69±0.06d	3.87±0.41b	1.55±0.12a	2.14±0.37de
	20	0.61±0.08d	3.82±0.04bc	1.26±0.14b	1.76±0.39ef
	30	0.58±0.08d	2.67±0.10fgh	1.21±0.20b	1.70±0.29ef
	40	0.61±0.05d	2.52±0.08gh	1.02±0.11bc	1.51±0.04f
茎 Stem	10	2.27±0.31d	3.92±0.21b	1.16±0.17b	3.53±0.09a
	20	1.73±0.20e	3.50±0.49bcd	0.74±0.06d	2.98±0.13bc
	30	1.46±0.10e	3.33±0.13cde	0.69±0.09d	2.48±0.12cd
	40	1.54±0.24e	2.94±0.26efg	0.44±0.06e	2.11±0.18de
叶 Leaf	10	2.60±0.13b	3.18±0.18def	0.83±0.05cd	3.02±0.31b
	20	2.29±0.21b	2.98±0.26defg	0.71±0.05d	2.50±0.09cd
	30	1.43±0.13c	2.15±0.03h	0.59±0.08de	1.50±0.16f
	40	0.00±0.00e	2.20±0.26h	0.41±0.06e	1.42±0.26f

同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Different letters in same column indicate significant differences between treatments at the 0.05 level.

表6 野胡萝卜不同部位浸提液处理下4种草坪草的芽长

Table 6 Shoot length of four species treated with extracts from different parts of *D. carota* at different concentrations

处理 Treatment	浓度 Concentration /(g · L ⁻¹)	芽长 Shoot length/cm			
		白三叶 <i>T. repens</i>	黑麦草 <i>L. perenne</i>	翦股颖 <i>A. stolonifera</i>	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>
CK	0	0.61±0.06abc	4.86±0.04a	1.02±0.02bc	3.21±0.12cd
根 Root	10	0.51±0.03c	4.90±0.15a	1.39±0.18a	3.94±0.06ab
	20	0.56±0.03bc	4.44±0.33ab	1.28±0.13ab	3.28±0.13cd
	30	0.52±0.01c	4.09±0.22bcd	1.24±0.15ab	3.10±0.15de
	40	0.51±0.04c	4.13±0.24bcd	1.25±0.21ab	2.73±0.08ef
茎 Stem	10	0.71±0.04a	4.22±0.33bc	1.19±0.05abc	4.12±0.29a
	20	0.65±0.07ab	3.79±0.13cde	1.11±0.03abc	3.61±0.09bc
	30	0.62±0.02abc	3.64±0.07de	1.03±0.05bc	3.14±0.06de
	40	0.50±0.03c	3.08±0.29f	0.93±0.06c	2.91±0.24de
叶 Leaf	10	0.62±0.04abc	3.87±0.40cde	1.18±0.08abc	3.21±0.33cd
	20	0.60±0.02abc	3.37±0.24ef	1.15±0.20abc	2.44±0.29f
	30	0.55±0.05bc	2.30±0.09g	1.03±0.13bc	1.58±0.13g
	40	0.00±0.00d	2.39±0.15g	0.93±0.13c	1.27±0.19g

同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Different letters in same column indicate significant differences between treatments at the 0.05 level.

表 7 浸提液种类、浓度和草坪草品种对草坪草种子萌发及幼苗生长影响的三因素方差分析

Table 7 Three factor variance analysis of the effects of extract types, concentrations and species on turfgrass seed germination and seedling growth

变异来源 Source of variation	F 值 F value						
	自由度 df	发芽率 R_C	发芽势 P_C	发芽指数 I_C	活力指数 I_V	根长 L_R	芽长 L_S
E	2	111.12 **	157.67 **	151.05 **	145.28 **	31.01 **	111.35 **
C	3	64.42 **	96.50 **	91.82 **	160.97 **	56.42 **	63.55 **
S	3	481.95 **	553.48 **	321.66 **	1478.78 **	360.24 **	1551.17 **
E×C	6	3.13 **	3.25 **	1.91	2.13	3.68 **	4.98 **
E×S	6	37.94 **	48.98 **	79.73 **	27.00 **	17.40 **	27.80 **
C×S	9	1.39	1.74	7.42 **	25.47 **	2.39 *	11.11 **
E×C×S	18	2.33 **	2.97 **	5.61 **	1.67	1.98 *	1.10

“*”表示显著影响($P<0.05$),“**”表示极显著影响($P<0.01$);E:浸提液种类,C:浸提液浓度,S:草坪草品种。

“*”and“**” indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 level, respectively. E: Extraction species; C: Extract concentration; S: Turfgrass species.

表 8 野胡萝卜不同部位浸提液对 4 种草坪草的化感综合效应指数

Table 8 Allelopathy comprehensive effect index of extracts from different parts of *D. carota* on four species

供体植物部位 Donor plant site	受体植物 Recipient plants	化感综合效应指数 I_{SE}				平均 Average	排名 Ranking
		10 g · L ⁻¹	20 g · L ⁻¹	30 g · L ⁻¹	40 g · L ⁻¹		
根 Root	白三叶 <i>T. repens</i>	-0.437	-0.466	-0.595	-0.667	-0.541	1
	黑麦草 <i>L. perenne</i>	-0.021	-0.126	-0.209	-0.304	-0.165	3
	翦股颖 <i>A. stolonifera</i>	-0.130	-0.274	-0.317	-0.387	-0.277	2
	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>	0.056	-0.034	-0.104	-0.230	-0.078	4
茎 Stem	白三叶 <i>T. repens</i>	-0.093	-0.194	-0.239	-0.568	-0.274	2
	黑麦草 <i>L. perenne</i>	-0.067	-0.148	-0.206	-0.298	-0.180	3
	翦股颖 <i>A. stolonifera</i>	-0.185	-0.293	-0.336	-0.549	-0.340	1
	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>	0.121	0.049	-0.077	-0.147	-0.014	4
叶 Leaves	白三叶 <i>T. repens</i>	-0.598	-0.666	-0.770	-1.000	-0.759	1
	黑麦草 <i>L. perenne</i>	-0.140	-0.232	-0.437	-0.439	-0.312	3
	翦股颖 <i>A. stolonifera</i>	-0.110	-0.310	-0.501	-0.661	-0.396	2
	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>	0.009	-0.126	-0.408	-0.508	-0.258	4

本研究表明,随着野胡萝卜根、茎、叶浸提液浓度的逐渐增大,白三叶和翦股颖的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数均呈现不同程度的降低,且随着浸提液浓度的升高抑制效果加强。这与星毛委陵菜 *Potentilla acaulis* L.茎叶和根系水浸提液对 5 种牧草种子萌发的影响基本一致(任秀珍等, 2010)。黑麦草的发芽率、发芽势和高羊茅的发芽势、发芽指数、活力指数在根浸提液处理下,黑麦草的发芽势、发芽指数和高羊茅的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数在茎浸提液处理下,黑麦草的发芽率和高羊茅的发芽率、发芽指数、活力指数在叶浸提液处理时均呈现出“低促高抑”的双重效应。陶俊杰等(2014)在研究野胡萝卜水浸提液对 2 种禾本科杂草的化感作用中发现,随着浸提液浓度的增加,对雀麦 *Bromus tectorum* L.种子化感抑制作用增强,对野燕麦 *Avena fatua* L.种子的化感作用整体表现为“低促高抑”现象,这与本研究结果基本一致。

4 种草坪草对野胡萝卜不同部位、不同浓度的

化感耐受力表现出一定的差异,野胡萝卜相同部位、相同浓度浸提液对 4 种草坪草的化感作用也不同,可能野胡萝卜的化感物质在不同部位具有差异,野胡萝卜化感作用具有一定物种选择性及浓度效应(任秀珍等,2010)。通过对野胡萝卜浸提液种类、浸提液浓度和草坪草品种进行三因素方差分析发现,浸提液浓度对草坪草种子萌发和幼苗生长影响相对较弱,这与李钰莹等(2020)研究黄花蒿 *Artemisia annua* L.浸提液对 4 种草坪草种子萌发及幼苗生长的影响的三因素交互作用分析结果基本一致。化感综合效应指数表明,野胡萝卜不同部位浸提液对高羊茅的化感作用表现为“低促高抑”的双重效应,白三叶、黑麦草和翦股颖则表现为抑制作用,野胡萝卜浸提液对白三叶和翦股颖的化感抑制作用强于黑麦草和高羊茅,原因可能是不同草坪草品种间的耐受差异,具体原因需要做深入细致的研究。王辉等(2022)研究发现,3 种供试牧草对舟叶橐吾 *Ligularia cylbulifera* (W. W. Smith) Hand.-

Mazz. 植株浸提液的敏感程度也有差异。野胡萝卜不同部位浸提液对4种草坪草的化感作用有一定差异,其中叶浸提液的化感作用最强。这与袁着耕等(2017)对刺苍耳 *Xanthium spinosum* L. 不同部位水浸提液的研究中得出其叶浸提液的化感作用最强的结果一致。本研究结果可为野胡萝卜入侵严重地区草坪的建植提供一定理论依据。

参考文献

曹婧, 徐晗, 潘绪斌, 戎郁萍, 2020. 中国草地外来入侵植物现状研究. 草地学报, 28(1): 1-11.

桂富荣, 蒋智林, 金吉斌, 和淑琪, 蒋兴川, 李正跃, 2011. 紫茎泽兰化感作用对9种草本植物种子萌发的影响. 生物安全学报, 20(4): 331-336.

李澳然, 马森, 苏筱田, 姚明珠, 王蕊蕊, 祝园凯, 2020. 意大利苍耳的化感作用对油葵种子萌发的影响. 种子, 39(4): 35-40.

李凤兰, 武佳文, 姚树宽, 赵梓颐, 赵潇璐, 贺付蒙, 朱元芳, 石奇海, 周磊, 徐永清, 2020. 假苍耳不同部位水浸提液对5种土著植物化感作用的研究. 草业学报, 29(9): 169-178.

李玉霞, 尚春琼, 朱珣之, 2019. 入侵植物马缨丹研究进展. 生物安全学报, 28(2): 103-110.

李钰莹, 刘娜, 荆则尧, 温伟, 曹磊, 夏方山, 朱慧森, 2020. 黄花蒿浸提液对4种草坪草种子萌发及幼苗生长的影响. 草地学报, 28(5): 1285-1293.

廖慧璇, 周婷, 陈宝明, 陈恩健, 张海杰, 彭少麟, 2021. 外来入侵植物的生态控制. 中山大学学报(自然科学版), 60(4): 1-11.

卢东升, 吴昊, 陈俊帆, 石佰舜, 2019. 入侵植物大狼把草对2种农作物的化感作用. 信阳师范学院学报(自然科学版), 32(4): 544-548.

鲁京慧, 2018. 紫茎泽兰叶浸提液对4种冰草的化感作用. 江苏农业科学, 46(9): 90-94.

马永林, 马跃峰, 郭成林, 王彦辉, 覃建林, 2016. 假臭草水浸提液对4种作物的化感作用. 生物安全学报, 25(4): 275-278, 307.

任秀珍, 郭宏儒, 葛耀, 张永亮, 王塋, 2010. 星毛委陵菜茎叶和根系水浸提液化感作用的研究. 中国草地学报, 32(5): 51-56.

师小平, 陈银萍, 闫志强, 罗永清, 李玉强, 丁浚刚, 颀海帆, 2020. 植物化感作用研究进展. 生物技术通报, 36(6): 215-222.

陶俊杰, 李玮, 郭青云, 2014. 野胡萝卜水浸提液对两种禾本科杂草的化感作用. 江西农业大学学报, 36(6): 1270-1274.

王辉, 马向丽, 另如贵, 张燕, 任健, 代微然, 2022. 舟叶橐吾浸提液对三种牧草种子萌发及幼苗生长的影响. 草地学报, 30(1): 93-99.

姚树宽, 李凤兰, 彭丽娜, 冯旭, 董佳敏, 冯哲, 张俊峰, 赵巧琴, 冯珊珊, 徐永清, 胡宝忠, 2018. 假苍耳不同部位水浸提液对五种十字花科植物化感作用的研究. 草业学报, 27(9): 56-66.

袁着耕, 刘影, 邵华, 赵玉, 胡云霞, 2017. 外来入侵植物刺苍耳各部位的化感作用研究. 河南农业科学, 46(2): 73-77.

张玥, 张泉灵, 洪志, 阚子涵, 储昭月, 陶冶, 2021. 入侵植物北美车前和野胡萝卜种内及种间的化感作用. 植物研究, 41(3): 441-448.

赵威, 王艳杰, 李亚鸽, 2017. 草地入侵植物对枝叶去除的生理生态响应: 模式、机理与研究展望. 草业学报, 26(6): 195-202.

郑亚萍, 余涵霞, 张昕宇, 欧巧菁, 岳茂峰, 李伟华, 2021. 薇甘菊化感物质对土壤氮素矿化的影响及其化感利己作用. 生物安全学报, 30(2): 110-119.

周娟娟, 魏巍, 谢文栋, 严俊, 王有侠, 何世丞, 2021. 燕麦植株浸提液对垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长的化感作用. 中国草地学报, 43(8): 18-25.

KAYANIFARD M, MOHSENZADEH S, 2017. Allelopathic analysis of four ecotypes of ajowan. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 41(4): 971-978.

KALISZ S, KIVLIN S N, BIALIC-MURPHY L, 2021. Allelopathy is pervasive in invasive plants. *Biological Invasions*, 23(2): 367-371.

PENG X B, 2019. Allelopathic effects of water extracts of maize leaf on three Chinese herbal medicinal plants. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(1): 194-200.

SARA G, KAREN A H, INGRID M P, 2012. Direct and indirect effects of allelopathy in the soil legacy of an exotic plant invasion. *Plant Ecology*, 213(12): 1869-1882.

TOSHIHIRO O, 2019. Metabolons in plant primary and secondary metabolism. *Phytochemistry Reviews: Fundamentals and Perspectives of Natural Products Research*, 18(6): 1483-1507.

WILLIAMSON G B, RICHARDSON D, 1988. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls. *Journal of Chemical Ecology*, 2(24): 181-187.

ZHANG Z, LIU Y, YUAN L, WEBER E, KLEUNEN M V, 2021. Effect of allelopathy on plant performance: a meta-analysis. *Ecology Letters*, 24(2): 348-362.